

鉄塔直下の掘削と供用線への避難連絡坑の接続

平田 亮*1・柚木崎 守*2・白板 伸一*3・松山 哲也*4

概 要

阪和自動車道 藤白トンネルⅡ期線は、送電鉄塔直下を土被り 13m で掘削すること、さらに供用中のⅠ期線に避難連絡坑を接続しなくてはならないといった条件での施工であった。

鉄塔直下の施工では、掘削によって鉄塔に影響を与える範囲を鉄塔影響範囲とし、それ以前に試験施工区間を設け、地山内部および地表面の変位計測、鉄塔本体の挙動計測を実施しながら、計測結果を施工にフィードバックさせながら施工した。

避難連絡坑の施工では、供用中のⅠ期線の安全を確保するため、発破振動計測を実施し、計測結果から掘削工法の変更を行った。

キーワード：藤白トンネル・小土被り・送電鉄塔・供用線・避難連絡坑

EXCAVATION JUST BELOW PYLONS AND CONNECTION OF EVACUATION TUNNEL
WITH A TUNNEL IN SERVICERyou HIRATA*1, Mamoru YUKIZAKI*2
Shinichi SHIRAITA*3, Tetsuya MATSUYAMA*4

Abstract

The project of the Fujishiro tunnel phase II line on the Hanwa Expressway required two major projects, excavation with a thin overburden of 13 m just below pylons and connection of the evacuation tunnel with the I phase line in service.

For the work just below the pylon, an assumption was made regarding the range around the pylon that would be affected by excavation. A test work zone was set up in advance, where displacement in the ground and on the surface, and the behavior of the pylon were measured. Excavation was made, while feeding back the measurement results.

In the construction of evacuation tunnel, to ensure safety of the phase I line in service, vibrations induced by blasting were measured, and based on the measurement results, a suitable excavation method was selected.

Keywords: Fujishiro tunnel, thin overburden, power transmission pylon, line in service, evacuation tunnel

*1 Technological proposal group, Civil Engineering Department, Civil Engineering Division

*2 Civil Engineering Business Department, KYUSYU Branch

*3 NIHONMATSU Site Office, TOHOKU Branch

*4 TERAOKAWA-KITA Site Office, OSAKA Branch

鉄塔直下の掘削と供用線への避難連絡坑の接続

平田 亮*1・柚木崎 守*2・白板 伸一*3・松山 哲也*4

1. はじめに

阪和自動車道 海南～有田間（旧海南湯浅道路）は、1984年に京阪神圏と和歌山県南部地域を連結する自動車専用道路として供用された。その一区間である藤白トンネル（I期線）は、和歌山県海南市の南方に位置し、当時は完成2車線のトンネルとして供用を迎えた。しかし、商業や観光産業の発展に伴って交通量が増大し、頻繁に渋滞が発生するようになった。そのため、II期線（4車線化）工事が計画された。

本報告では藤白トンネル II期線北側工区で実施した、

- ① 送電鉄塔の計測および下部通過のために実施した対策工
- ② 避難連絡坑掘削時の発破振動が I期線覆工に与える影響を最小限に抑制するための掘削方法および I期線接続部の補強対策

以上2点について報告するものである。

2. 工事概要

本工事は、藤白トンネル II期線（延長2,136m）の北側工区（延長1,151m）および I期線に接続する避難連絡坑（車両通行用）を NATMにより建設するものである。

本工事の概要を表-1に示す。

3. 地形・地質概要

3.1 地形概要

当該地区は紀伊山地の西縁にあたり、和歌

表-1 工事概要

工事件名	近畿自動車道（紀勢線）藤白トンネル北工事
発注者	西日本高速道路㈱関西支社
施工者	鉄建建設㈱・金下建設㈱特定建設工事共同企業体
施工場所	和歌山県海南市藤白～和歌山県海南市下津町
工期	平成16年8月26日～平成20年4月6日
施工内容	本坑：延長1151m、掘削断面70.3m ² 、縦断勾配0.46%
	非常駐車帯：掘削断面108.9m ²
掘削方式	避難連絡坑：延長62m、掘削断面19.5m ² 、縦断勾配11.9%
	本坑：発破掘削、機械掘削 避難連絡坑：発破掘削、割岩掘削

山東山地の標高200～400mの小起伏山地に属し、比較的緩やかな稜線を持つ山体が連なっている。山地の北斜面は急傾斜であるが、南斜面は北斜面より緩傾斜である。

3.2 地質概要

和歌山県付近は、西南日本外帯最北部に位置し紀伊半島を東西に横断する三波川帯の分布域である。本トンネルの地層は、この三波川帯の南側に接し、分布する岩石は、高压低温型の変成作用を受けた結晶片岩より構成される。表-2に主な地質を示す。

表-2 地質構成

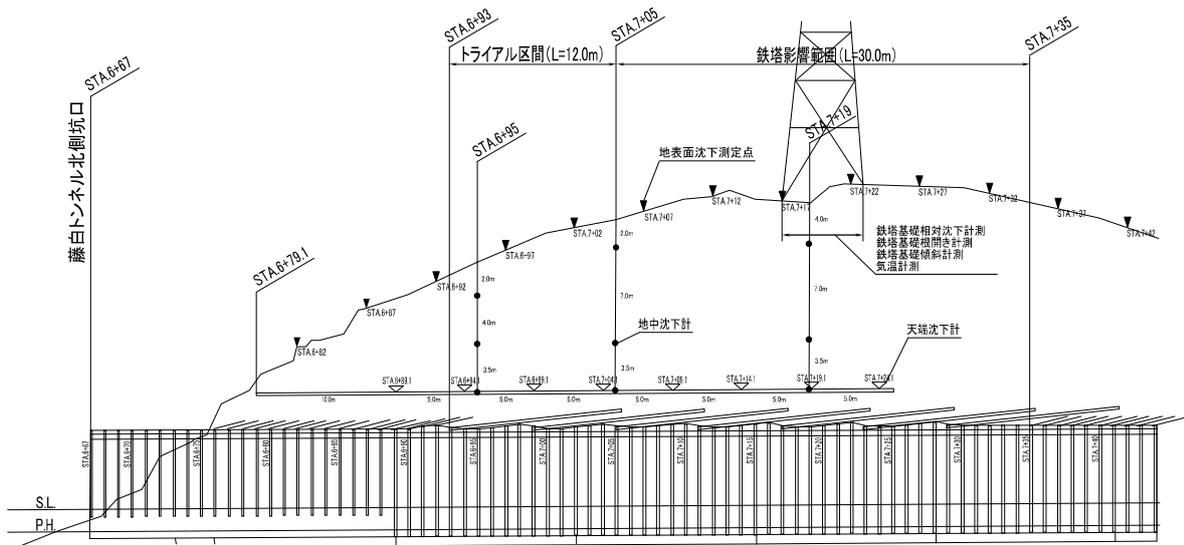
地質年代	地質名	記号	記事
新生代 第四紀 完新世	崖錐堆積物	dt	山腹斜面、山麓部、沢部等に分布する。礫混じり土砂よりなる。
中生代 三波川帯	黒色片岩	Bs	泥質片岩とも言われる。片理が発達し剥離性に富む。
	緑色片岩	Gs	塩基性片岩とも言われる。片理の発達した岩～弱い片理を示す岩～塊状岩と岩相変化が激しい。
	石英片岩	Qs	珪質片岩とも言われる。黒色片岩中に層厚1cm～数mで頻繁に挟まれている。
	蛇紋岩	Sp	葉片状～粘土状岩体からなる。岩質はやや軟質である。トンネルにとって要注意岩である。
	輝緑岩	Dm	塊状岩体であるが、弱い片理を示す。

*1 土木本部 土木部 技術提案グループ

*2 九州支店 土木営業部

*3 東北支店 二本松作業所

*4 大阪支店 寺川北作業所



図－１ 鉄塔部一般図

4. 送電鉄塔下の小土被り部の施工

4.1 施工の問題点

藤白トンネルⅡ期線北側工区には、坑口から約 55m、土被り約 13m の小尾根部に高さ約 20m の関西電力送電鉄塔があり、トンネル掘削に伴う緩みにより、鉄塔基礎部に不等沈下等の変状が発生する懸念があった。そこで、掘削に先立ち図－1 に示すように、掘削による緩みが鉄塔へ影響を及ぼす範囲を鉄塔の前後計 30m 間（鉄塔影響範囲）とし、また、その手前 12m 間をトライアル区間と位置付け、このトライアル区間に、各種計測器を設置し、変位の事前解析値と実測値を比較し、鉄塔影響範囲の支保パターンと補助工法の妥当性の検証を行った。

4.2 管理基準値

鉄塔基礎沈下の管理基準値は、実測最小脚間距離のそれぞれ 1/1200（鉛直方向）、1/800（水平方向）に対して各管理レベルを決定した（表－3）¹⁾。

表－3 鉄塔本体変状管理基準値

管理レベル	鉄塔基礎 相対沈下	鉄塔基礎 根開き	備考
	(鉛直方向)	(水平方向)	
通常 (40%)	1.98mm以下	2.96mm以下	
注意 (60%)	2.97mm以上	4.45mm以上	応急対策
警戒 (80%)	3.96mm以上	5.93mm以上	施工中断
厳戒 (90%)	4.45mm以上	6.67mm以上	施工中止

4.3 事前解析

施工に先立ち、ボーリングコアの室内試験結果（三軸圧縮試験その他）から得た地山物性値（表－4）を用いて三次元 FEM 解析を行い、管理基準値を満足するかどうか、その妥当性を検討した。

表－4 地山物性値

岩種	単位体積重量 γ (kN/m ³)	弾性係数 E (MN/m ²)	ポアソン比 ν	粘着力 C (kN/m ²)	内部摩擦角 φ (°)
土砂+軟岩C	21	30	0.325	20	20
軟岩A	25	200	0.300	250	30
硬岩A	25	450	0.300	550	30
断層	20	50	0.350	10	10

対策なしでは鉄塔基礎の最大不等沈下量が管理基準値を超える値となったため、補助工法として、トンネル上部の変位抑制効果の高い²⁾AGF(L=12.5m, n=24.5本, シフト長=6.0m)を用い、解析を実施した結果、最大不等沈下量は管理基準値の注意レベル以内の変位である 2.81mm となり、AGF の変位抑制効果を確認できたため、補助工法として採用することとした。

4.4 計測工

鉄塔本体の計測としては、鉄塔基礎の鉛直方向変位、水平方向変位、傾斜および計測機器の温度補正用の温度測定の時計 4 項目を実施した。

周辺地盤計測においては、層別沈下計および地表面沈下測点を設置した。また、先行沈下を把握するためトンネル天端から 2.5m 直上に坑口から鉄塔直下まで圧力式沈下計を設置した。表-5 に各計測項目を示す。これらの計測結果をリアルタイムで監視し、異常な変位が発生した場合の早期の対応が可能な体制で掘削を開始した。

表-5 計測項目一覧

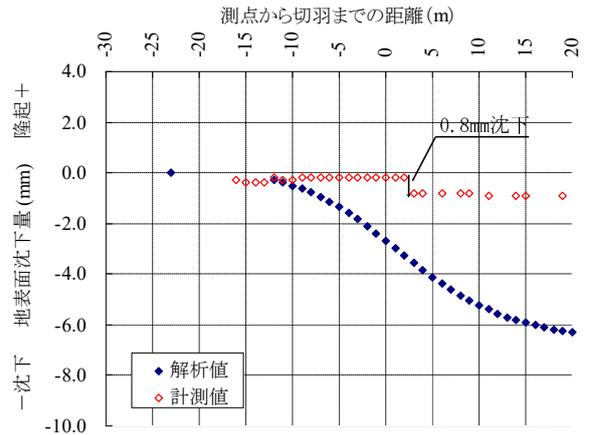
計測対象	計測項目	数量	使用機器
鉄塔本体	鉄塔基礎相対沈下	4箇所	連通管式沈下計
	鉄塔基礎根開き	6測線	FBGファイバセンサ付インバー線
	鉄塔基礎傾斜	1箇所×2方向	FBG傾斜計
	温度計	2箇所	FBG温度計
周辺地盤	地中沈下計測	5箇所 (16測点)	層別沈下計
	トンネル天端沈下計測	1箇所 (8測点)	圧力式沈下計
	地表面沈下計測	39測点	トータルステーション

4.5 トライアル区間の施工結果

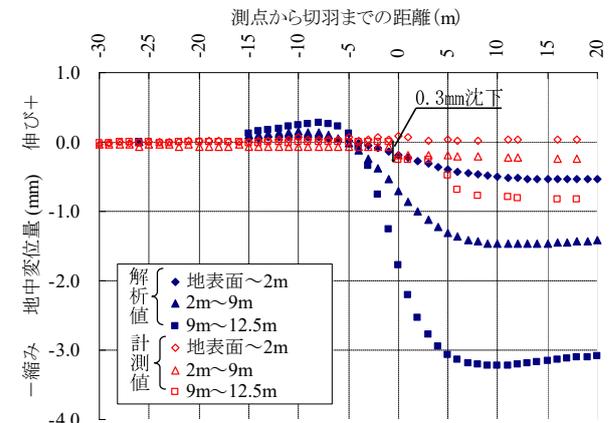
図-2 にトライアル区間施工時における地表面沈下量 (STA. 7+02), 層別沈下計による地中変位量 (STA. 7+05), 圧力式沈下計による天端直上 2.5m の沈下量 (STA. 7+04) の事前解析値と実測値を比較した結果を示す。この結果より、トライアル区間施工完了時の地表面の絶対沈下量は 0.8mm 程度、また地中変位量も相対変位で 0.3mm 程度であり、解析値と比較して安全側の値内となっており、AGF によるトンネル上部の地山補強効果が確認できた。しかし、天端直上 2.5m に設置した沈下計測は、解析値に比べ大きな値を示しており、切羽通過後約 1ヶ月の掘削中断期間中 (インバート施工のため) も変位に増加傾向が見られ、掘削再開時まで最大 15.4mm の沈下を示した。これは、天端沈下計付近の地山が、トンネル掘削の応力解放により片理面に沿って分離し、局所的に緩んだものと判断された。

4.6 鉄塔影響範囲の施工結果

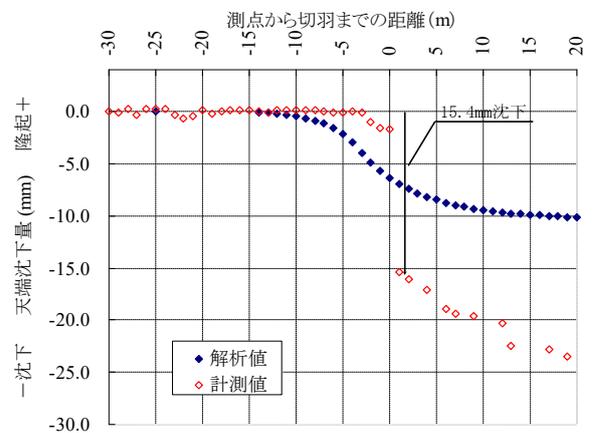
鉄塔影響区間の施工にあたっては、トライアル区間における天端直上の地山の緩みによる沈下、および AGF 施工時にトンネル右側



a) 地表面沈下計測結果



b) 層別沈下計による地中変位計測結果

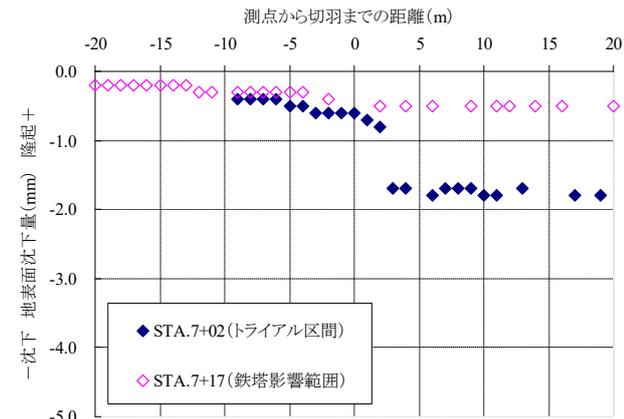


c) 天端直上 2.5m の沈下計測結果

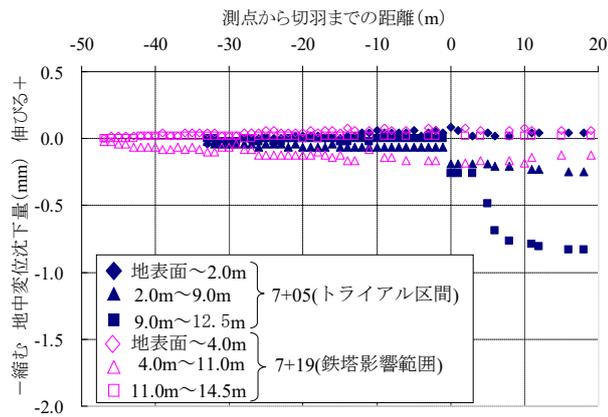
図-2 トライアル区間における周辺地盤計測結果

半分では注入材が定量注入で圧力上昇が見られなかったこと、切羽の風化状態や亀裂の状況、トンネル左右の土被り厚の状態等を考慮して、AGF の注入率をトライアル区間より大きく設定し、トンネル直上の緩み領域の補強を行った。

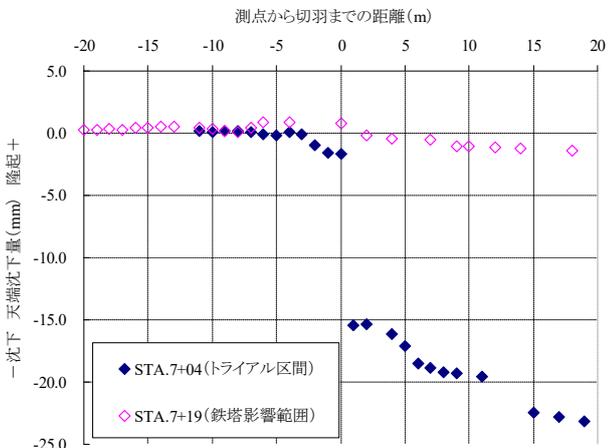
図-3に切羽の進行に伴う鉄塔影響範囲の地表面沈下，地中変位，天端沈下の変位挙動を示す。この図から，トライアル区間に比べ鉄塔影響範囲では，各沈下量ともに変位が減少していることがわかる。これは，注入量を増加したため，掘削により発生する緩み領域の拡大が抑制されたものと考えられる。



a) 地表面沈下量の比較



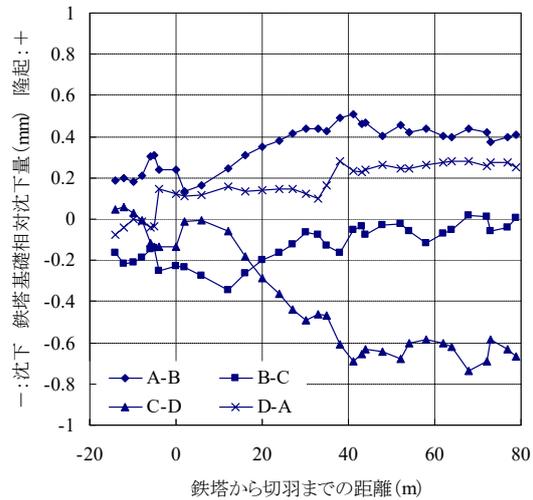
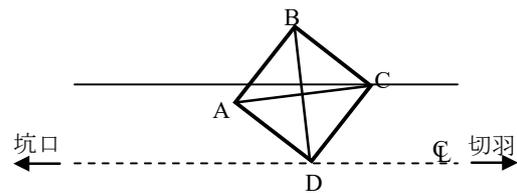
b) 層別沈下計による地中変位量の比較



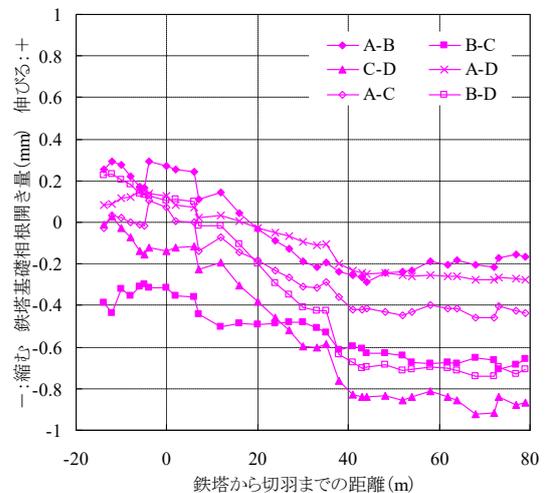
c) 天端直上 2.5m の沈下量の比較

図-3 鉄塔影響範囲における
周辺地盤計測結果

また，図-4に鉄塔本体の計測結果を示す。鉄塔基礎相対沈下および鉄塔基礎根開きともに，鉄塔直下を切羽が通過後，微小な動きはあったものの，その変位量は鉄塔基礎相対沈下量で 0.8mm の沈下，鉄塔基礎根開き量で 0.9mm の収縮方向の変位といずれも管理基準値の通常レベル範囲内の変位であり，トンネル掘削による鉄塔本体の大きな変状は認められなかった。



a) 鉄塔基礎相対沈下量



b) 鉄塔基礎根開き量

図-4 鉄塔本体計測結果

5. 供用線に避難連絡坑を接続

5.1 施工の問題点

I 期線に接続する避難連絡坑（延長約 62m, 断面 15.7m², 車両通行用）は, II 期線北側坑口より約 720m 地点（地山等級 C 区分）に計画されている（図-5）。暫定 2 車線施工（将来 4 車線化計画有）の場合では, 将来計画を見越し連絡坑を I 期線より 10m 程度施工しておき, II 期線より I 期線に向かって施工するのが一般的である。しかし, 本トンネル（I 期線）は完成 2 車線施工であったため I 期線からの施工はされていなかった。このため供用線覆工に対して避難連絡坑を新たに貫通する必要がある, 発破振動による I 期線への影響や, 貫通による安定性を考慮し施工する必要があった。

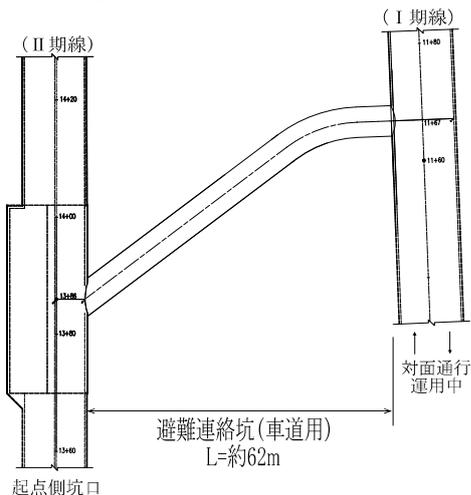


図-5 避難連絡坑位置図

5.2 掘削方法の検討

発破掘削による振動が, I 期線覆工のひびわれの発生およびコンクリート片の落下の要因になる。そこで, 接続部の I 期線覆工壁面に加速度計を設置し, 発破振動速度の測定を実施することとした。また, 発破振動による I 期線覆工への動的影響を考慮するため, 避難連絡坑掘削以前に式 (1) ³⁾を用いて振動速度を予測し, 発破パターンや掘削距離を検討した。K 値の算出にあたっては, II 期線の本坑掘削時の発破振動速度から逆算した。

$$V = K \frac{W^{0.75}}{D^2} \quad (1)$$

ここで, V: 振動速度 (cm/sec)

K: 係数

W: 段当たりの薬量 (kg)

D: 爆源からの距離 (m)

進捗に従い, あらかじめ設定した変位速度の管理基準値 (2.0cm/sec: 表-6) を超えることが予想される場合は, 段当り薬量の減少 (制御発破) 及び振動の影響の無い油圧くさびによる掘削工法 (割岩掘削) ⁴⁾ (写真-1) への変更を行うこととした。

表-6 発破振動管理基準値

	III	II	I
管理レベル	1次管理値 (限界値の50%)	2次管理値 (限界値の75%)	3次管理値 (管理限界値)
振動速度	1.0cm/sec	1.5cm/sec	2.0cm/sec



写真-1 割岩掘削状況

5.3 接続部の補強方法の検討

接続部では, 避難連絡坑を貫通させるため I 期線の覆工が避難連絡坑断面形状で欠損する構造となり, 周辺地山の応力性状の変化に伴って, 現状で安定している覆工コンクリートの応力状態に変化が生じることとなるため, 接続部の構造について検討した。

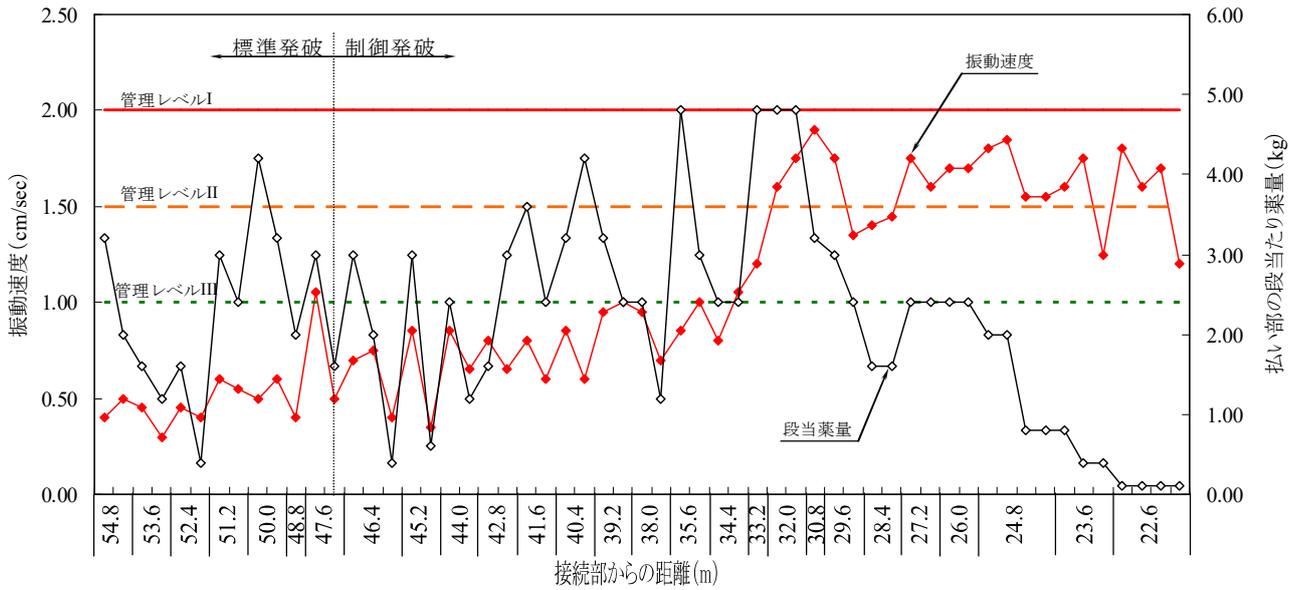


図-6 払い発破の振動計測結果

接続部付近の I 期線の施工実績から、2 次元弾性 FEM 解析によって、地山の変形係数および、I 期線施工時のトンネル周辺の緩み領域を予測し、さらに、避難連絡坑の掘削による緩み領域を算定した。また断面欠損部については、欠損断面が最大となる避難連絡坑のトンネルセンターの断面において、許容応力度法により覆工構造の検討を行った。解析の結果、I 期線および避難連絡坑ともに、過大な応力性状の変化はみられなかった。

5. 4 施工結果

図-6 に払い部の段当たり薬量と発破振動計測結果の関係を示す。標準発破区間では、II 期線近接施工となるため、II 期線側の 10m 区間は飛石等を考慮し薬量を控えて掘削した。接続部より 47m 付近で振動速度が 1.0cm/sec を超えたため、掘進長を半分の 0.6m に変更して制御発破にシフトした。その後、振動速度は管理レベル I 以下で推移したが、30m 付近で 1.9 cm/sec を示したため、薬量を半減した。その後も段階的に薬量を低減したにもかかわらず、振動速度は変動しないため、22m 地点で振動の影響のない大型油圧くさびによる割岩掘削へシフトした。割岩掘削に変更後の振動速度は管理基準値以下で推移し、

I 期線の覆工に影響を与えることなく掘削を完了した。

解析結果より接続部の I 期線覆工および避難連絡坑の一次支保は構造上安定することが確認できた。しかし、作用荷重によって発生する覆工のひびわれが脆性的に進展することから、安全性を考慮し、断面欠損により発生する I 期線覆工の応力増加分を、鋼製支保工と高強度吹付けコンクリートによる補強構造体と、アンカーボルトにより分散させた。また、避難連絡坑掘削による周辺地山の緩み範囲を最小限に抑制するため、接続部の影響範囲には増しロックボルトを打設し、剛性の高い支保とした(図-7)。

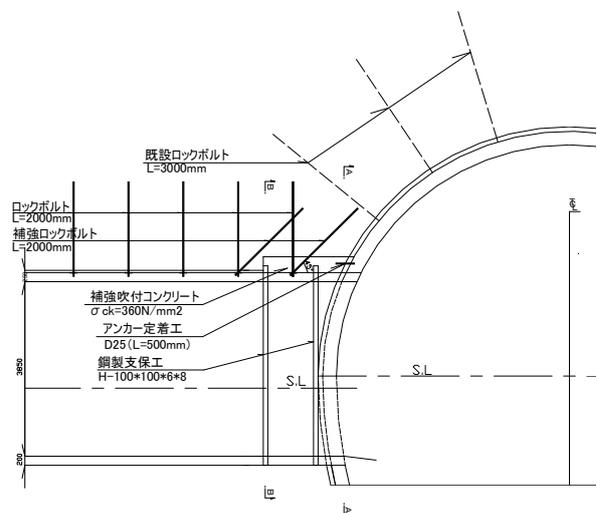


図-7 I 期線接続部補強対策工

接続部の避難連絡坑の覆工は、応力性状が複雑になることや、I期線の覆工がある程度経年劣化していることから、長期的な安定を目的にI期線覆工の欠損に伴う想定荷重を避難連絡坑の覆工コンクリートで負担する構造とした。

構造検討の結果、引張応力が無筋コンクリートの許容値以上になることが確認されたため、RC構造へ変更し安定性を確保した。なお、施工はI期線覆工に防護板を配置し、一般通行を規制することなく完了した。

6. おわりに

本工事は近接施工および小土被り等、様々な制約を受ける条件での施工であった。

送電鉄塔脚部の不等沈下対策においては、その管理基準値が2.97mm以下と非常に厳しいものであった。そのため、施工にあたっては、類似事例調査、三次元FEM解析、鉄塔本体および周辺地盤の挙動計測を行い、また、トライアル区間を設定して事前解析値と実測値を比較検討することにより鉄塔影響区間における施工法の妥当性と追加対策等の必要性の確認を行った。

避難連絡坑の施工においては、通行規制を実施せずに供用線に避難連絡坑を接続しなくてはならなかった。そのため、事前の安定解析から断面欠損による応力再配分に伴う周辺地山および覆工の安定度低下の予測と対策の選定を行った。またI期線の覆工の発破振動計測を継続的に行い、発破ごとの計測値から発破パターンや薬量および掘削工法の見直しを行った結果、I期線覆工および通行車両へ支障を与えることなく施工を完了することができた。

本報告が今後の同様な条件下における供用線および重要構造物近接工事を施工するうえで参考になれば幸いである。

参考文献

- 1) 電気学会：送電用支持物設計標準（JEC-127-1979），1979
- 2) 土木学会：トンネル標準仕方書 山岳工法・同解説,2006
- 3) 東/中/西日本高速道路（株）：設計要領第三集 トンネル本体工保全編（近接対策），2006
- 4) 野間，土屋：硬岩の小断面避難連絡坑における割岩掘削，トンネル工学報告集第15巻，2005